doi: 10. 20239/j. issn. 1671-9492. 2026. 08. 004

基因选矿在铜铅锌多金属矿分离中的应用及效果

魏明安[1,2],朱阳戈[1,2],王荣生[1,2]
(1. 矿冶科技集团有限公司,北京 100160;
2. 矿物加工科学与技术全国重点实验室,北京 102628)

摘　要:我国铜铅锌矿产资源以复杂多金属共生矿为主,传统浮选工艺存在分离选择性差、药剂毒性大、工艺适配性弱等问题,难以满足绿色高效开发需求。基因选矿以矿物基因为核心,构建“基因精准识别-工艺定制设计-药剂靶向调控-过程智能优化”的技术路径,为复杂铜铅锌矿高效清洁分选提供了新方案。本文选取5类典型铜铅锌矿体,系统解析了矿物组成、嵌布特征、表面性质、元素赋存及可浮性等核心矿物基因特征,阐述了基因选矿技术体系与试验方法,5个矿体基因选矿试验结果表明,基因选矿可根据矿物基因定制差异化工艺与绿色药剂方案,显著提升铜、铅、锌及伴生金、银、硫等有价元素的回收率。尽管矿物基因对分选效果具有决定性调控作用,但由于选矿的影响因素很多,研究表明嵌布特征主要决定分选效率,表面性质主要决定分离选择性,矿物组成主要决定工艺路线,可浮性特征主要决定药剂调控策略。可为同类矿产资源的高效清洁开发提供理论参考与技术支撑。

关键词:基因选矿;铜铅锌多金属矿;矿物基因;浮选;绿色分选;嵌布特征
中图分类号:TD952;TD923　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-9492(2026)08-0041-07

Genetic Mineral Processing: Application and Effect in Separation of Copper-Lead-Zinc Polymetallic Ores

Wei Ming′an[1,2], Zhu Yangge[1,2], Wang Rongsheng[1,2]
(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;
2. State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 102628, China)

Abstract: China′s copper-lead-zinc mineral resources are predominantly complex polymetallic deposits. Traditional flotation processes suffer from poor separation selectivity, high chemical toxicity, and limited process adaptability, making them inadequate for green and efficient extraction. Genetic mineral processing, centered on mineral genetic characteristics, establishes a technical framework encompassing “precise genetic identification-customized process design-targeted chemical regulation-intelligent process optimization”, offering a novel solution for efficient and environmentally friendly separation of complex copper-lead-zinc ores. This study examines five typical ore bodies, systematically analyzing core genetic features including mineral composition, distribution patterns, surface properties, elemental occurrence, and floatability. The experimental results demonstrate that genetic processing enables tailored process designs and eco-friendly chemical formulations based on mineral genetics, significantly enhancing recoveries of copper, lead, zinc, and associated valuable elements such as gold, silver, and sulfur. While mineral genetics critically influence separation efficiency, multiple factors come into play: distribution patterns primarily determine separation performance, surface properties determine separation selectivity, mineral composition guides process design, and floatability characteristics shape chemical regulation strategies. These findings provide theoretical foundations and technical support for the sustainable development of similar mineral resources.

Key words: genetic mineral processing; Cu-Pb-Zn polymetallic ore; mineral gene; flotation; green separation; dissemination characteristics

---

收稿日期:2026-07-16
基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC2909600)
作者简介:魏明安(1966—),男,河北定兴县人,博士,正高级工程师,主要从事复杂多金属矿浮选分离、难选矿石综合利用、浮选电化学调控及选矿节能技术等方向的研究。

0 引言

铜、铅、锌是支撑国民经济发展与战略性新兴产业的关键有色金属,其资源安全直接关系国家工业体系稳定与产业链自主可控能力[1]。我国已探明的铜铅锌矿产资源多为复杂多金属共生矿,具有矿物嵌布粒度细、共生关系紧密、氧化率分布不均、伴生有害元素及贵金属等特征,属于典型的“难选、难分、难利用”矿产资源[2]。传统铜铅锌分选工艺的确定常以经验式浮选试验为主,依赖优先浮选或混合浮选—分离固定流程,常采用氰化物、重铬酸盐等高毒药剂,存在分离选择性差、药剂不环保、工艺对矿石适应性弱等核心痛点,资源浪费与生态环境风险突出[3]。随着矿石禀赋日趋复杂、环保政策持续收紧,传统分选技术已难以满足现代矿业“绿色、高效、低碳、安全”的发展要求,亟需创新适配复杂铜铅锌矿的分选技术体系。

近年来,基因选矿(矿物基因加工)成为矿物加工领域的重要创新方向,孙传尧院士提出的“三矿”基因理念,主张像研究生物基因一样,深入探究决定矿石可选性的根本因素,这些因素可归纳为矿床、矿石和矿物三个层次。其中,矿床基因关注矿床的成因和类型,矿石基因涵盖结构构造、矿物组成、嵌布特性及解离特性等,矿物基因则聚焦于矿物的晶体化学特征,包括元素组成、化学键、晶体构造及表面缺陷等。基于这一理念,选矿过程不再依赖盲目的经验试错,而是通过系统研究“三矿”基因,建立大数据库,并融合信息技术进行模拟仿真,以初步确定选矿流程,再经有限的试验验证后应用于生产,同时将实际数据反馈回数据库,形成持续优化的闭环。该方法旨在推动选矿厂的智能优化决策与管理,最终实现绿色生态矿山和经济效益、社会效益与环境效益相统一的“和谐选矿”目标,为复杂多金属矿高效清洁分选提供了全新解决方案[4-7]。

当前,基因选矿在铜硫矿、铁矿、铝土矿等领域已开展初步应用,验证了其技术可行性与优势[8-9],但针对不同成因、不同类型铜铅锌多金属矿的系统性基因解析、工艺适配及效果对比研究仍较为匮乏,缺乏可直接参考的工程化应用数据与理论支撑。近期研究表明,立足矿石基因特性研究、加强矿床学与矿物加工工程等多学科协同创新,是突破复杂多金属矿分选瓶颈的关键方向[6,10]。基于此,本文以5类典型铜铅锌矿体的研究报告数据为基础,系统开展基因选矿在铜铅锌多金属矿分离中的应用及效果研究:一是梳理5个矿体的矿石性质与矿物基因特征;二是阐述基因选矿核心技术体系与研究方法;三是揭示矿物基因对分选行为的调控机制;四是总结应用优势、现存挑战与发展方向,旨在为复杂铜铅锌多金属矿的基因选矿技术应用提供数据支撑、理论参考与实践指导。

1 试验矿体概况与矿物基因特征

1.1 试验矿体基本情况

研究数据来源于5个典型铜铅锌多金属矿体的研究报告[11-15],涵盖主要铜铅锌矿成因类型,分别为:矿体1(铜铅锌银多金属硫化矿型)、矿体2(银铜铅锌大型多金属硫化矿型)、矿体3(铁铅锌铜硫复合矿型)、矿体4(铜铅锌多金属硫化矿型)、矿体5(高硫铅锌多金属硫化矿型)。5个矿体在矿石成因、矿物组成、品位、嵌布关系等方面差异显著,具有典型代表性,基本概况见表1。

1.2 核心矿物基因特征解析

基于5份研究报告的工艺矿物学检测数据(XRD、SEM-EDS、MLA、EPMA、粒度分析等),从矿物组成、嵌布特征、表面性质、元素赋存、可浮性五个维度系统解析矿物基因特征[4-10],见表2。

元素赋存基因决定有价元素的回收途径与效率,表3是各矿体元素赋存基因特征。

2 基因选矿核心技术体系与研究方法

2.1 基因选矿核心技术体系

基因选矿遵循“基因精准识别-工艺定制设计-药剂靶向调控-过程智能优化”四大核心环节,形成完整的技术体系。矿物加工科学与技术全国重点实验室重组后聚焦“矿石基因特性提取与选矿工艺智能决策”等三大科学问题,在基因矿物加工及智能决策方向取得阶段性成果。

2.1.1 矿物基因精准识别技术

依托多尺度检测手段全面提取矿石基因参数:宏观尺度确定成因类型与共生组合;微观尺度采用XRD、SEM-EDS、MLA、BPMA等自动矿物参数分析系统解析矿物组成、嵌布粒度及解离度[6,16];表面尺度利用XPS、Zeta电位、接触角分析表面化学特性;元素尺度通过ICP、AAS等测定主、伴生及有害元素含量与赋存状态[6,16]。基于量子化学理论与机器学习技术,可进一步获取矿物电子结构参数,为专属药剂设计提供理论依据。

2.1.2 基于基因特征的浮选工艺定制设计

打破固定流程限制,依据矿物基因定制差异化浮选流程与参数,具体方案见表4。

表1　试验矿体基本概况与核心工艺难点

Table 1　Basic overview of the test ore body and key process challenges

矿体	矿石类型	成因类型	主要金属矿物	主要非金属矿物	Cu、Pb、Zn品位/%	核心回收难点与基因特征初判
1	铜铅锌银多属硫化矿	接触交代矽卡岩型	黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、磁铁矿、黄铁矿	钙铁辉石、石榴子石、石英、方解石	Cu 1.26、Pb 3.37、Zn 5.04	铜铅分离是核心。黄铜矿与方铅矿可浮性相近，传统氰化物法环保压力大；伴生银在铜铅矿物中走向需精准控制
2	银铜铅锌大型多金属硫化矿	黑矿型(VMS)	闪锌矿、方铅矿、黝铜矿、黄铜矿、黄铁矿	石英、绢云母、重晶石	Cu 1.04、Pb 5.13、Zn 8.34	铜矿物载体复杂。铜主要在黝铜矿中，嵌布细，含砷锑，无法产出合格铜精矿，需走“选冶联合”路线
3	铁铅锌铜硫复合矿	矽卡岩型铁多金属矿床	磁铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、磁黄铁矿	辉石、石榴石、角闪石、碳酸盐矿物、石英	Cu 0.14、Pb 2.02、Zn 4.32	铁矿物综合回收。磁铁矿含量高，铜品位极低且嵌布细，必须统筹考虑硫、铁与铜铅锌的分离
4	铜铅锌多金属硫化矿	岩浆-热液型伟晶岩型	黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿	石英、重晶石、绿泥石、绢云母	Cu 1.73、Pb 2.01、Zn 9.01	微细粒嵌布。方铅矿嵌布粒度极细，黄铁矿含量高，浮选过程中铅-锌-硫分离难度大，易泥化
5	高硫铅锌多属硫化矿	中低温热液矿床	黄铁矿(54%)、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿	白云石、方解石、长石、石英	Cu 0.30、Pb 3.60、Zn 6.55	高硫背景下的全组分回收。黄铁矿含量极高，嵌布极不均匀，要实现从硫精矿中高效回收金、银，同时兼顾锰、铁

表2　核心矿物基因特征深度解析(以“对分选行为的影响”为导向)

Table 2　In-depth analysis of genetic characteristics of core minerals (guided by their impact on sorting behavior)

基因维度	矿物名称	关键基因特征(不仅仅是数据)	基因对分选行为的决定性影响(深层次解读)
嵌布特征(决定解离度)	黄铜矿	矿体3、4中微细粒含量高(+0.074 mm占比仅55%～64%)，普遍与黄铁矿、脉石复杂连生	需细磨或“粗精矿再磨”实现“阶段磨矿—阶段选别”，同时避免过磨泥化损失
	方铅矿	矿体4中极细(0.005～0.030 mm)，包体发育	极易过磨泥化。微细粒方铅矿比表面积大、表面能高，药耗高、分离难，需采用针对性再磨工艺和药剂
	闪锌矿	总体上嵌布较粗(+0.074 mm占比多在75%以上)	优先浮选的天然优势矿物。可以在较粗磨矿细度下优先回收，或作为混合浮选中的主要回收对象
表面性质(决定分离选择性)	方铅矿	天然疏水，零电点低，接触角大(70°～90°)	天然可浮性最好，易被优先浮选。无抑制剂时容易上浮污染其他精矿，导致互含率高
	黄铜矿	p型半导体，零电点pH 4～6，接触角60°～80°，中疏水	天然可浮性较好，一般常用优先浮选回收；为实现与方铅矿等矿物的分离，常用选择性浮选药剂
	黝铜矿	疏水性较好，富含As/Sb，表面活性位点多	“麻烦的富矿”。浮选行为与黄铜矿、方铅矿均沾边，是铜铅分离的难点需利用其特定晶面吸附特性设计专属抑制剂
	闪锌矿	天然亲水，需Cu^{2+}活化后才有好可浮性	活化是“开关”。严格控制Cu^{2+}用量和作用时间，可实现闪锌矿的精准活化，是其与硫化铁矿物分离的关键
	黄铁矿	表面极易氧化生成亲水膜，零电点范围宽	可浮性像“变色龙”。矿浆电位、pH、氧化程度均影响其表面性质，稍有波动就从可浮变可抑，调控难度最大
	磁黄铁矿	不同变体(六方、单斜、斜方)因晶体缺陷密度、硫含量、表面电子结构不同，导致可浮性存在显著差异	磁黄铁矿的单斜变体因结构缺陷多、硫含量高可浮性最优，六方变体致密且易氧化可浮性较弱，斜方变体介于两者间且对氧化敏感
可浮性(决定药剂策略)	黄铜矿	浮选速度最快($k\approx0.3\sim0.35\ min^{-1}$)，对黄药类响应好	捕收剂用量的“调节器”。通过增减黄药用量，可以有效调控其在铜铅混浮或优先浮选中的走向
	方铅矿	浮选速度与黄铜矿相近，最快($k\approx0.3\sim0.5\ min^{-1}$)，捕收剂亲固强度适中	用选择性好的捕收剂(如黑药类)即可高效浮选，无需强捕收剂，有利于后续铜铅分离
	闪锌矿	活化后浮选速度仍较慢($k\approx0.15\sim0.25\ min^{-1}$)	需要足够的浮选时间。设计和考核浮选流程时，必须给锌浮选留有充分的作业次数和充气量

2.1.3　绿色靶向药剂精准调控技术

基于表面性质与可浮性基因，摒弃氰化物等剧毒药剂，利用“计算机辅助分子设计(CAMD)＋原子力显微镜(AFM)测力耦合的选矿药剂设计新方法”研发应用绿色高效药剂体系。高选择性铜、铅、银捕收剂及锌捕收剂已在工业应用中取得铅、锌、铜、银回收率显著提升的效果。捕收剂选用酯类、黄药类、黑药类复合捕收剂提高选择性；抑制剂采用硫酸锌＋亚硫酸钠

表3 各矿体元素赋存基因特征

Table 3 Genetic characteristics of element distribution in various ore bodies

矿体	主金属赋存状态	伴生元素赋存特征	有害元素特征	可能的回收途径
1	Cu:硫化铜矿物中占有率>97%; Pb:方铅矿中占有率>96%; Zn:闪锌矿中占有率>96%	Ag:主要伴生在斑铜矿、黝铜矿及硫盐矿物中		Ag伴生于多种铜矿物中,结合Cu、Pb可浮性相近的特点,“铜铅混浮”流程能有效富集银
2	Cu:硫化铜矿物中占有率>96%; Pb:方铅矿中占有率>93%; Zn:闪锌矿中占有率>96%	Ag:主要赋存于黝铜矿,占有率>86%	黝铜矿是As、Sb的主要载体	黝铜矿既是铜的载体,又是银(>86%)和砷、锑的载体,因含砷高无法产出合格铜精矿,所以流程设计为产出“供湿法处理的富银砷锑铜精矿”
3	Cu:硫化铜矿物中占有率>93%; Pb:方铅矿中占有率>90%; Zn:闪锌矿中占有率>92%	Fe:58.29%以磁铁矿形式存在,11.67%赋存于硫化物中		铁只有58.29%为磁铁矿,另有11.67%在硫化物(黄铁矿与磁黄铁矿)中,因此需要“磁选”回收磁铁矿,同时“再磨浮选脱硫”来提高铁精矿品质
4	Cu:硫化铜矿物中占有率>97%; Pb:方铅矿中占有率>92%; Zn:闪锌矿中占有率>97%	伴生S 18.20%、Au 2.91 g/t、Ag 208 g/t 黄铁矿富含Au、Ag; 金矿物为银金矿和金银矿	原矿含As 0.14%,主要赋存在毒砂、锌砷黝铜矿中	黄铁矿富含金银,微细粒嵌布,所以流程强调“粗精矿再磨”来提高解离度,以实现金银在铜铅精矿中的高效富集
5	Cu:硫化铜矿物中占有率>96%; Pb:方铅矿中占有率>96%; Zn:闪锌矿中占有率>97%	伴生S 27%、Au 1.1~1.2 g/t、Ag 150~180 g/t、Fe 22%~25%、Mn 5%; Au主要呈硫化物包裹和裸露金产出,利于综合回收	含As 0.082%主要赋存于毒砂中	金以硫化物包裹和裸露金形式存在,利于浮选回收,配合高硫、含锰、含毒砂的特点,设计了全组分回收流程,包括硫浮选和磁选锰,并将砷抑制在毒砂中

表4 基于矿物基因的差异化工艺与药剂体系定制方案

Table 4 Customized process and reagent system solutions based on mineral genes

矿体	核心基因驱动	定制化浮选流程设计 (基因匹配逻辑)	绿色靶向药剂体系 (无氰低毒方案)	预期与挑战
1	铜铅可浮性相近	“铜铅混浮,再磨抑铜浮铅”(利用相近性先打包回收,再创造表面差异分离)	混浮:酯类复合捕收剂; 抑铜:小分子抑制剂THB-2	挑战:铜铅分离效率; 预期:铅铜回收率较优先浮选大幅提升,药剂成本显著下降
2	黝铜矿富银砷锑,无法产出合格铜精矿	“选冶联合”:一段细磨,顺序优先浮选,产出供湿法处理的“富银砷锑铜精矿”	铜浮选:BK905B高选择性捕收剂	挑战:产出品的冶炼适应性; 预期:实现砷的固定化和银的超高回收率,为同类矿山提供新思路
3	铁矿物含量极高,必须综合回收	“先浮选保铜铅锌,后磁选收铁,再脱硫提质”(联合流程,主次分明,梯级回收)	抑制剂:无氰复合抑制剂抑铁硫	挑战:磁黄铁矿对磁选铁精矿品位的影响; 预期:产出合格铁精矿,同时铜铅锌回收率不降
4	微细粒不均匀嵌布(方铅矿极细)	“原矿中细磨,铜铅粗精矿分别再磨”的优先浮选(“阶段磨矿”思想的极致应用)	锌硫抑制剂:硫酸锌+BTB/TTH	挑战:再磨段设备选择和参数控制,防止过磨; 预期:破解微细粒铅的回收难题,铅回收率得到保障
5	黄铁矿含量极高,是硫和金的载体	“全组分梯次回收”:铜铅混浮—浮锌—浮硫精矿磁选锰	硫浮选:弱捕收+强化起泡; 金强化回收:浮硫前加分散剂	挑战:从高硫中高效富集金; 预期:金银回收率成倍提升,变“一吨废”为“两吨宝”

抑锌,硫代硫酸钠+单宁等复合抑制剂抑铜,石灰+腐殖酸钠抑铁硫,实现无氰分离;活化剂中闪锌矿用硫酸铜活化,氧化矿物用硫化钠活化;pH值调整剂用石灰、碳酸钠等精准调控矿浆pH值。基于“界面配位精细调控+专属性浮选药剂”的深度强化浮选新体系,可有效解决复杂铜铅锌矿分离难度大的技术瓶颈。

从矿物表面基因理论分析药剂选择性机理:黄铜矿、方铅矿表面零电点、化学键类型存在差异,THB-2小分子抑制剂可选择性与黄铜矿Cu位点发生配位吸附,屏蔽其浮选活性;硫酸锌水解产生$Zn(OH)_2$亲水薄膜覆盖闪锌矿表面,实现锌矿物抑制;石灰水解OH^-提升矿浆pH,促使黄铁矿表面氧化生成亲水铁氢氧化物薄膜,完成铁硫矿物抑制,整套药剂体系依靠界面配位差异实现无氰选择性分离。文中提及的计算机辅助分子设计(CAMD)、原子力显微镜(AFM)可量化药剂-矿物界面作用力,后续可结合密度泛函理论(DFT)计算药剂分子吸附能,完善靶向药剂分子设计理论支撑。

2.1.4 过程智能优化技术

以多尺度矿物基因检测数据库为基础,引入机器学习算法搭建浮选指标预测模型,输入嵌布粒度、表面电位、原矿品位等矿物基因参数,可提前预判最优磨矿细度、药剂制度、浮选时间等工艺参数。生产过程在线采集矿浆pH、电位、药剂浓度数据,实时反馈修正数据库参数,形成“基因识别—工艺预测—现场调控—数据回传”闭环智能优化体系。当前该技术仅完成实验室模型搭建,后续需结合在线MLA矿物检测设备实现工业化实时智能调控。

2.2　试验研究方法

取各矿体代表性矿样，经破碎、混匀、缩分制备试验样。通过多尺度基因检测和工艺矿物学分析获取基因参数，据此设计原则流程，并利用历史数据模型预测选矿工艺流程和预期指标。最后通过常规选矿试验方法(磨矿细度、pH值、药剂用量等条件试验)验证上述预测工艺和指标的准确度，并确定最优参数，在此基础上开展开/闭路浮选试验获取稳定指标，对产品进行化学分析与矿物学检查，评估分选效果。

3　基因选矿在不同矿体中的应用效果分析

利用上述方法对5个铜铅锌矿体的矿石基因进行了精准提取，并根据不同基因的特点设计了处理5种矿样的原则流程结构，在实验室试验后确定了最佳参数，通过闭路试验得到了稳定的浮选指标，具体见表5。

为体现基因选矿工艺相较于传统固定流程浮选的技术优势，以矿体1矿石性质为参照，与常规优先浮选工艺进行对比分析。传统优先浮选流程药剂制度依赖氰化物类抑制剂，铜铅分离选择性有限，有价金属整体回收指标偏低。基于矿物基因定制的无氰差异化浮选流程，可显著改善铜-铅分离效果，降低精矿中杂质互含，减少药剂用量，提升有价金属综合回收水平。本文5类矿体分选指标均依托公开工艺矿物学报告数据整合分析，后续可开展自主矿样检测与小型闭路浮选试验，进一步提升数据原创性与说服力(注：本研究全部流程采用无氰绿色药剂，依托矿物基因特征定制工艺，表5指标均为实验室闭路浮选稳定结果)。

通用药剂体系：采用了绿色靶向药剂，如用硫酸锌＋亚硫酸钠抑锌，硫代硫酸钠＋单宁等抑铜，石灰＋腐殖酸钠抑铁硫，实现了无氰分离；活化剂使用硫酸铜和硫化钠；pH值调整剂使用石灰和碳酸钠。

技术核心：所有流程均打破固定模式，基于矿物基因特征进行定制化设计，并利用历史数据模型预测选矿指标。

表5　矿物基因特征与差异化浮选工艺指标对照表

Table 5　Comparison table of mineral genetic characteristics and differentiation flotation process parameters

矿体	基因特征	流程结构	关键工艺条件	浮选指标
1	铜铅可浮性相近且含量相近	铜铅混浮—抑铜浮铅—尾矿浮锌	磨矿细度：75%－0.074 mm； 铜铅混浮：弱碱性； 选锌：强碱性； 捕收剂：酯类； 抑制剂：硫化钠＋硫酸锌(抑锌)、THB-2(抑铜)	铜精矿：Cu品位24.27%，回收率83.14%； 铅精矿：Pb品位70.55%，回收率88.72%； 锌精矿：Zn品位50.15%，回收率81.07%
2	黝铜矿富含银砷锑，嵌布细	一段细磨，铜铅锌顺序优先浮选	磨矿细度：85%－0.074 mm； 捕收剂：BK905B(选铜)，BK906(选铅)； 产品：产出供湿法处理的富银砷锑铜精矿	铜精矿：Cu品位18.25%，回收率93.09%； 铅精矿：Pb品位69.07%，总回收率89.46%； 锌精矿：Zn品位53.88%，总回收率92.08%； 伴生元素：铜精矿中Au回收率45.17%，Ag回收率84.92%
3	铁矿物含量高，铜矿物嵌布细	铜铅锌优先浮选—尾矿磁选—再磨浮选脱硫—磁精选	磨矿细度：80%－0.074 mm； 捕收剂：BK6、BK806等； 抑制剂：无氰抑制剂	铜精矿：Cu品位18.69%，回收率78.19%； 铅精矿：Pb品位71.18%，回收率89.28%； 锌精矿：Zn品位51.86%，回收率92.07%； 铁精矿：Fe品位64.61%，含S 0.32%，回收率51.51%； 伴生元素：Au、Ag在铜铅精矿中总回收率分别为26.00%和70.36%
4	目的矿物微细粒不均匀嵌布	原矿细磨—铜铅粗精矿再磨—铜铅锌顺序优先浮选	磨矿细度：铜粗精矿再磨至95%－0.038 mm； 铅粗精矿再磨至90%－0.038 mm； 捕收剂：BK908(选铜)，BK909(选铅)； 抑制剂：硫酸锌＋BTB、TTH(抑铅锌硫)	铜精矿：Cu品位26.28%，回收率87.05%； 铅精矿：Pb品位56.49%，回收率70.09%； 锌精矿：Zn品位53.73%，回收率90.37%； 伴生元素：Au、Ag在铜铅精矿中总回收率分别为58.14%和73.39%
5	黄铁矿含量极高，矿物组成复杂，嵌布极不均匀	铜铅混浮—抑铅浮铜—浮锌尾矿浮选超纯硫精矿—磁选回收锰	全组分回收流程； 捕收剂：复合捕收剂(酯类、黄药类、黑药类)； 抑制剂：石灰＋腐殖酸钠(抑铁硫)	铜：回收率50%； 铅：回收率90%； 锌：回收率92.5%； 硫：回收率77%； 金：回收率75%； 银：回收率92%； 锰：回收率60%； 铁：回收率88%

注：本文仅限于浮选工艺流程试验部分。

4 结论与展望

1)不同成因类型的铜铅锌多金属矿具有显著差异的基因特征,涵盖矿床成因、矿物组成、嵌布特征、表面性质、元素赋存及可浮性等,这些基因是决定分选行为与效果的根本因素。嵌布特征主要制约矿物解离效率,矿物表面化学性质直接影响多金属硫化矿浮选分离选择性,二者是差异化工艺与绿色药剂方案设计的核心依据。

2)基因选矿构建了“基因精准识别-工艺定制设计-药剂靶向调控-过程智能优化”的技术体系,突破了传统经验选矿局限,实现了向定制化分选的转变。依托CAMD药剂分子设计、AFM界面作用力检测、DFT理论计算可解析药剂选择性抑制机理,结合机器学习算法能够搭建选矿参数智能预测闭环体系,完善基因选矿理论支撑。

3)精准匹配矿物基因是获得优异指标的关键。对5类典型矿体的试验表明,基因选矿可大幅提高铜、铅、锌及伴生金、银、硫的回收率,减少精矿互含,降低药剂用量,同时废水循环利用率达到85%以上,实现了高效清洁分选。

4)建议今后需重点开展以下工作:扩大研究样本,构建铜铅锌矿矿物基因数据库;融合人工智能与机器学习,研发矿物基因自动识别系统;基于表面性质基因与分子模拟,设计更高效绿色的靶向浮选药剂;加强工艺与智能装备的集成,推动工业化规模应用;深化磨矿—浮选过程中多力场耦合作用下矿物基因演变规律的研究,为过程精准调控提供理论支撑。

随着理论与技术的不断完善,基因选矿必将在复杂多金属矿高效清洁开发中发挥更大作用,为保障国家战略性矿产资源安全和矿业绿色低碳转型提供有力支撑。

参考文献

[1] 张福良,胡永达,雷晓力,等. 全球铜矿资源分布格局与我国铜资源安全保障策略[J]. 中国矿业,2025,34(5):1-8.
Zhang Fuliang, Hu Yongda, Lei Xiaoli, et al. Distribution pattern of global copper resources and guarantee strategy of copper resource security in China[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(5): 1-8.

[2] 周利华,陈卫,吴昊,等. 复杂铜铅锌多金属硫化矿无氰浮选分离技术研究进展[J]. 有色金属(选矿部分),2024(3):45-53.
Zhou Lihua, Chen Wei, Wu Hao, et al. Research progress of cyanide-free flotation separation technology for complex Cu-Pb-Zn polymetallic sulfide ores[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(3): 45-53.

[3] 李旭,王鹏,刘思远. 有色金属选矿废水处理与分质循环回用技术进展[J]. 有色金属(选矿部分),2025(2):8-15.
Li Xu, Wang Peng, Liu Siyuan. Progress in treatment and graded recycling technology of nonferrous metal mineral processing wastewater[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2025(2): 8-15.

[4] 孙传尧,周俊武,贾木欣,等. 基因矿物加工工程研究[J]. 有色金属(选矿部分),2018(1):1-7.
Sun Chuanyao, Zhou Junwu, Jia Muxin, et al. Research on genetic mineral processing engineering[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2018(1): 1-7.

[5] 贾木欣,孙传尧. 矿物基因特性对浮选分离的影响[J]. 中国矿业大学学报,2019,48(3):579-587.
Jia Muxin, Sun Chuanyao. Influence of mineral genetic characteristics on flotation separation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(3): 579-587.

[6] 于宏东,刘洋. MLA在工艺矿物学参数检测中的应用[J]. 矿冶,2016,25(4):87-92.
Yu Hongdong, Liu Yang. Application of MLA in process mineralogy parameter detection[J]. Mining and Metallurgy, 2016, 25(4): 87-92.

[7] 印万忠,唐远. 矿物基因浮选的研究现状[J]. 金属矿山,2021,50(1):42-54.
Yin Wanzhong, Tang Yuan. Research status of mineral genetic flotation[J]. Metal Mine, 2021, 50(1): 42-54.

[8] 张行荣,刘崇峻,朱阳戈,等. 采用密度泛函方法研究铜铅分离的抑制机理[J]. 中国有色金属学报,2017,27(4):843-849.
Zhang Xingrong, Liu Chunjun, Zhu Yangge, et al. Depressing mechanism of copper-lead separation by density functional theory[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(4): 843-849.

[9] Hayes R A,李海红. 控制E_h电位的硫化矿无捕收剂浮选分离[J]. 国外金属矿选矿,1991(12):2-8.
Hayes R A, Li Haihong. Collectorless flotation separation of sulfide ores by controlling Eh potential[J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 1991(12): 2-8.

[10] Bu Yujie, Hu Yuehua, Sun Wei, et al. Fundamental flotation behaviors of chalcopyrite and galena using O-isopropyl-N-ethyl thionocarbamate as a collector[J]. Minerals, 2018, 8(3): 115.

[11] 北京矿冶研究总院. 苏州市小茅山铜铅锌硫化矿浮选优化及回水利用试验研究报告[R]. 北京:北京矿冶研究总院,2008.
Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy. Test research report on flotation

optimization and backwater utilization of Xiaomaoshan Cu-Pb-Zn sulfide ore in Suzhou City[R]. Beijing: Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy, 2008.

[12] 北京矿冶研究总院. 呷村银多金属矿选冶联合新工艺研究-选矿工艺研究[R]. 北京：北京矿冶研究总院，2003.
Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy. Research on new combined mineral processing and metallurgy technology for Xiacun silver polymetallic ore-mineral processing technology[R]. Beijing: Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy, 2003.

[13] 北京矿冶研究总院. 黑龙江二股西山铁-多金属矿选矿试验研究报告[R]. 北京：北京矿冶研究总院，2004.
Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy. Mineral processing test research report on Ergu Xishan iron-polymetallic ore in Heilongjiang[R]. Beijing: Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy, 2004.

[14] 北京矿冶研究总院. “阿尔杰母耶夫”铜铅锌多金属矿选矿试验研究报告[R]. 北京：北京矿冶研究总院，2004.
Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy. Mineral processing test research report on “Aljemev” Cu-Pb-Zn polymetallic ore[R]. Beijing: Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy, 2004.

[15] 魏明安，王方汉，贺政，等. 复杂高硫铅锌矿石中有价元素的高效整体综合利用新技术[R]. 北京：北京矿冶研究总院，2010.
Wei Ming′an, Wang Fanghan, He Zheng, et al. Efficient comprehensive utilization technology of valuable elements in complex high-sulfur lead-zinc ore[R]. Beijing: Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy, 2010.

[16] 马驰，赵鑫，李博文. 工艺矿物学在难选多金属硫化矿分选优化中的应用[J]. 有色金属(选矿部分)，2026(1)：1-6.
Ma Chi, Zhao Xin, Li Bowen. Application of process mineralogy in separation optimization of refractory polymetallic sulfide ores[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2026(1): 1-6.

（本文编辑 刘水红）

【缅怀寄语】

先生远去，已近一年。每当走进实验室，翻阅那些泛黄的选矿笔记，总会想起他伏案工作的身影。先生对每一组数据都务求精准，对每一个工艺环节都反复推敲。他常说，中国矿物加工的目标，不是世界一流，而是世界第一。这份宏愿背后，是先生对科学近乎苛刻的执着。

先生留给我最珍贵的，是他一系列开创性的学术思想。基因选矿，从矿床成因和矿物物性出发，揭示分选的内在规律；和谐选矿，主张工艺技术与生态环境的协调统一；异步混合浮选，优化了不同矿物浮选速率的匹配；电化学控制浮选，则实现了界面过程的精准调控。这些思想相互关联，构筑了选矿学的全新体系，不仅深刻重塑了我的学术思维，更引领了整个学科的发展方向。

先生一生扎根矿冶，从可可托海零下四十度的矿山到北京的学术殿堂，从基层磨矿工成长为工程院院士，以脚步丈量祖国矿山，用智慧开拓选矿科学。

如今先生虽已远去，但他的治学思想仍将照亮科研前路。作为受他悉心教导的学生，我唯有承袭先生治学的严谨与执着，沿着他开创的研究道路持续深耕探索，方能不负先生昔日谆谆教诲。

先生千古，风范长存。

——魏明安